



**O papel de fungos micorrízicos arbusculares na tolerância do feijão
comum ao crômio**

Sérgio Marques Costa

Professor Doutor, UNOESTE, Brasil
sergiocosta@unoeste.br

Hélida Regina Sala

Doutoranda, UNOESTE, Brasil.
helidahrs@hotmail.com

Ana Cláudia Pacheco Santos

Professora Doutora, UNOESTE, Brasil.
anaclau@unoeste.br

Alba Regina Azevedo Arana

Professora Doutora, UNOESTE, Brasil.
alba@unoeste.br

Máira Rodrigues Uliana

Professora Doutora, UNOESTE, Brasil.
mairal@unoeste.br

RESUMO

O cromo (Cr) é um metal pesado prejudicial à saúde e ao desenvolvimento de culturas alimentícias, afetando a segurança alimentar. O feijão comum (*Phaseolus vulgaris*), de grande importância nacional, pode formar relações simbióticas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e se adaptar a diversas condições ambientais. Este estudo avaliou a influência de duas espécies de FMAs no desenvolvimento do feijoeiro em solos contaminados com cromo. O experimento utilizou vasos de três litros com terra, inoculados com *Rhizophagus clarus* ou *Claroideoglossum etunicatum*, com ou sem cromo. O experimento ocorreu em câmara de crescimento controlado. No quarto estágio vegetativo, foram avaliadas trocas gasosas, taxa de transporte de elétrons, análise bioquímica, teor de cromo, colonização micorrízica e crescimento das plantas. As plantas inoculadas com *R. clarus* apresentaram maior taxa de assimilação de CO₂ (Pn) e condutância estomática (Gs). Em relação às enzimas antioxidantes, plantas sem cromo mostraram maior atividade da superóxido dismutase. Já plantas com *C. etunicatum* tiveram menor atividade das enzimas catalase e peroxidase. A presença de cromo aumentou o teor de malondialdeído nas plantas com *R. clarus*, diminuiu o teor de peróxido nas plantas controle e reduziu os níveis de prolina nas plantas com *C. etunicatum*. A análise final mostrou que plantas com *C. etunicatum* apresentaram maior teor de cromo no solo e menor nas vagens. Este estudo destaca o potencial de espécies específicas de FMAs para melhorar o desenvolvimento do feijoeiro em solos contaminados com cromo e fornece informações sobre as interações planta-microorganismo e respostas fisiológicas na tolerância ao cromo.

Palavras-chave: metal pesado; *Rhizophagus clarus*; *Claroideoglossum etunicatum*; *Phaseolus vulgaris*; colonização micorrízica.

1 INTRODUÇÃO

A contaminação de culturas alimentares por metais pesados levou à exploração de técnicas de remediação do solo, focando na estabilização ou mobilização desses elementos (MARQUES; RANGEL; CASTRO, 2008; LOZANO-REÁTEGUI et al., 2023; ETSESAMI, 2018). Presentes em efluentes industriais, os metais pesados são altamente tóxicos e representam riscos à saúde humana (LEANDRO-SILVA et al., 2020). Solos retêm metais pesados, mas quando essa capacidade é excedida, os metais entram na cadeia alimentar. O excesso de metais pesados no organismo pode desequilibrar o sistema antioxidante (BARBOSA et al., 2019).

Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) formam associações simbióticas e mutualísticas com raízes de plantas, aumentando a absorção de nutrientes e água, promovendo fitoestabilização, tolerância a estresses ambientais e atuando como agentes de biorremediação (FONSECA et al., 2020; NUNES et al., 2019; WANG; LIN; YIN, 2005; WU et al., 2016). A biorremediação usa microrganismos para desintoxicar poluentes no solo, decompondo ou transformando substâncias perigosas em formas menos nocivas, reduzindo seu impacto ambiental (FARIA et al., 2017). *R. clarus* é uma espécie de FMA que produz grandes esporos, os maiores do gênero *Rhizophagus* (KOBAYASHI et al., 2018). Sobrevive e se reproduz em ecossistemas semiáridos, mesmo com baixa disponibilidade hídrica, sendo estudada para desenvolvimento de inoculantes para mudas florestais (TOMAZELLI et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2022). *Claroideoglossum etunicatum*, com distribuição global, protege plantas contra danos oxidativos em seca, aumentando antioxidantes (NACCOON et al., 2021). Ambos fungos estimulam a produção de óleos essenciais em plantas expostas a metais pesados, aumentando a concentração dos constituintes principais (URCOVICHE et al., 2015; MERLIN et al., 2020).

O curtimento do couro gera significativo impacto ambiental através da produção de efluentes ricos em cromo. O descarte inadequado contamina solo e água (GOMES et al., 2017; MAURYA et al., 2022; ŚWIETLIK; TROJANOWSKA, 2016). Presidente Prudente, SP, é o quinto

maior produtor de couro do estado (SEADE, 2019). Devido às intensas atividades de tratamento de couro, há crescente preocupação com a contaminação por cromo em solos agrícolas usados para culturas alimentares.

O cromo (Cr) é um metal pesado que pode existir em vários estados de oxidação, sendo Cr^{3+} e Cr^{6+} os mais comuns e usados no curtimento do couro (NASCIMENTO, 1983). Cr^{3+} interage complexamente com matéria orgânica no solo e ambientes aquáticos, formando complexos orgânicos, adsorvendo em superfícies orgânicas e incorporando em estruturas orgânicas (SINHA; PAKSHIRAJAN; CHATURVEDI, 2018). Cr^{3+} é considerado mais estável e geralmente menos prejudicial em baixas concentrações (GOMES; ROGERO; TIRAPGUI, 2005; LAL SINGH, 2019). Em condições alcalinas, Cr^{3+} pode oxidar-se e transformar-se em Cr^{6+} (cromo hexavalente), altamente solúvel e tóxico. Cr^{6+} é cancerígeno e um potente agente oxidante, apresentando riscos à saúde humana e ao meio ambiente, com alta solubilidade aumentando a contaminação de corpos hídricos (CASTILHOS; TEDESCO; VIDOR, 2002, SANTOS; ALMEIDA, 2020). Estudos mostram que Cr^{6+} afeta a estrutura dos cloroplastos, alterando tamanho, forma e estrutura interna (MAJHI; PANDA, 2010, RODRIGUEZ et al., 2012; QUADRO et al., 2019), teor de clorofila (TIWARI et al., 2009), fluorescência da clorofila a e trocas gasosas (LIU et al., 2008), além de enzimas antioxidantes (SAMANTARY, 2002).

Muitas espécies de plantas podem acumular metais pesados nos tecidos. Plantas agrícolas, como o feijão, são sensíveis às alterações fisiológicas, especialmente nos estágios iniciais da fase vegetativa, e possuem mecanismos adaptativos para responder a estressores ambientais, incluindo metais pesados (PORTUONDO FARIAS et al., 2020). O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.), da Família *Fabaceae* (SILVA; DUARTE, 2020), tem alta demanda nutricional e ciclo curto (ALMEIDA et al., 2022). A cultivar IAC Imperador é uma variedade de alto rendimento na agricultura orgânica, com crescimento determinado tipo I, maturação precoce e ciclo de 75 dias (TEIXEIRA et al., 2017). Resistente a patógenos e com alta produtividade, o feijão comum é crucial para a segurança alimentar devido ao seu alto teor de proteínas e adaptabilidade (SILVA; FERREIRA; NASCENTE, 2021). Nosso estudo avaliou o potencial de biorremediação dos fungos micorrízicos *Rhizophagus clarus* e *Claroideoglossum etunicatum* na tolerância de *Phaseolus vulgaris* L. em solos contaminados com cromo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Centro de Estudos em Ecofisiologia Vegetal do Oeste Paulista – CEVOP (Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE). Foram utilizados 30 vasos. Foram utilizados no experimento 30 vasos no total, onde antes do plantio, metade dos vasos receberam 10 mg/kg^{-1} de Cr^{6+} a partir da solução preparada com sal de $\text{Cr K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. O solo nos vasos de plantio passou por um período de estabilização que durou aproximadamente 15 dias. A concentração de Cr^{6+} foi escolhida de acordo com os limites determinados em cenário industrial pela CETESB (CETESB, 2017).

Sementes de *Phaseolus vulgaris* L., cultivar IAC Imperador, foram previamente tratadas com solução de peróxido de hidrogênio à 10% e então lavadas com água deionizada. A semeadura aconteceu em maio de 2021 sendo utilizada 6 sementes em cada vaso. Após 20 dias

de emergência de todas as plantas foi realizado o desbaste, permanecendo 2 plantas por vaso. Ao atingirem a quarta fase vegetativa, uma planta de cada vaso foi utilizada para avaliação dos parâmetros relacionados à fotossíntese e bioquímicos e em seguida retirada, assim, apenas uma planta por vaso completou o ciclo. A quantidade de água fornecida às plantas foi feita de modo manual, utilizando para que o solo ficasse sempre úmido. As plantas foram mantidas em câmara climatizada tipo Fitotron (Eletrolab, modelo EL 011) com temperatura controlada de 30° C diurna e 20° C noturna em vasos contendo 400 esporos de inoculante micorrízico (cerca de 200 g de inoculante) de *Rhizophagus clarus* (= *Glomus clarum*) (FMA 1) ou *Claroideoglomus etunicatum* (= *Glomus etunicatum*) (FMA 2) provenientes do banco de Glomales da UNIPAR e 3 Kg do solo vegetal esterilizado por alta temperatura. No tratamento controle cada vaso recebeu apenas 3 Kg de solo vegetal esterilizado.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado composto por esquema fatorial 3 x 2, com a colonização pelas duas espécies de FMAs e testemunha (sem inócuo), combinado com dois tratamentos de Cr (0 e 10 mg.kg⁻¹ de Cr⁶⁺), sendo utilizadas 5 repetições para cada tratamento.

As medidas instantâneas de trocas gasosas, foram realizadas analisando-se a concentração de CO₂ por infravermelho (Li-6400XTR, LiCor, EUA) com o fluorômetro de luz modulada (LI-6400-40). A assimilação de CO₂ (Pn), condutância estomática (Gs), concentração intercelular de CO₂ (Ci), e transpiração (E) foram quantificadas. As medidas da fluorescência da clorofila *a* foram realizadas simultaneamente às medidas de trocas gasosas, utilizando um medidor óptico de fluorescência (FluorPen FP100, Photo Systems Instruments) segundo Kotakis (2013) com modificações e a taxa de transporte de elétrons (ETR = DFFF * ΔF/Fm' * 0,5 * 0,84) foi segundo Bilguer et al. (1995).

O teor de proteína foi determinado de acordo com metodologia de Bradford (1976). A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi determinada segundo o método de Giannopolitis e Ries (1977). A atividade da enzima catalase (CAT) e a atividade da enzima peroxidase (POD) foram estimadas segundo Peixoto et al. (1999). A peroxidação de lipídeos foi realizada por quantificação da concentração de malondialdeído (MDA) usando o método de Li et al. (2010). O teor de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) foi determinado através do método de Velikova et al. (2000). O conteúdo de prolina foi extraído em ácido sulfosalicílico e sua concentração foi estimada conforme metodologia descrita por Bates et al. (1973).

O teor de Cr foi avaliado nas raízes, caules, folhas e vagens avaliado no solo seguindo a metodologia de Davies et al. (2001). Os coeficientes de fitoextração do Cr foram obtidos para as raízes, parte aérea e grãos, e foram calculados segundo Kumar et al. (1995).

Raízes frescas foram lavadas em água corrente e cortadas em segmentos para determinar a taxa de colonização das micorrizas por meio do método de observação de segmentos de raízes de Phillips e Hayman (1970). Os segmentos colonizados foram avaliados sob um microscópio estereoscópico (40–100 ×) (GIOVANETTI; MOSSE 1980).

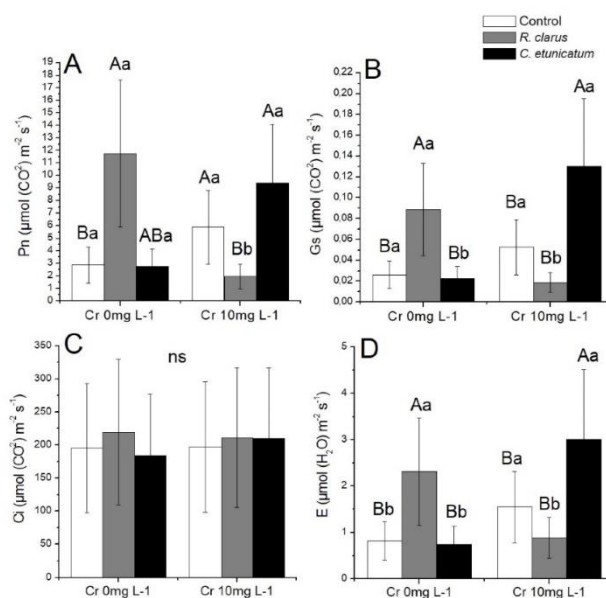
A massa fresca e seca (g) da parte aérea (folhas e caules), raízes e vagens foram pesados em balança de bancada para obtenção dos valores médios. Outras medidas biométricas

realizadas incluíram comprimento do caule, diâmetro, número de nós, número de folhas e número de vagens.

3 RESULTADOS

Os resultados indicaram que as doses de Cr aplicadas não causaram respostas significativas na concentração intercelular de CO₂ (Ci) (Figura 1– C). Já o inoculo *R. clarus* apresentou maior média para a da taxa de assimilação de CO₂ (Pn) e condutância estomática (Gs) (Figura 1– A e B) na dose 0 em comparação aos outros tratamentos. No tratamento incrementado com crômio houve diminuição desses valores em ambos parâmetros, porém em Pn, o tratamento controle apresentou diminuição.

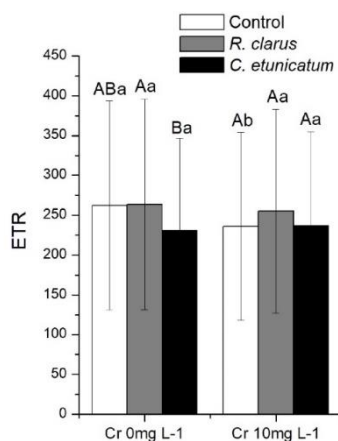
Figura 1 – Efeitos fisiológicos causados em plantas de feijão inoculadas e submetidas a doses Crômio.



Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) no tratamento. Fonte: A Autora (2023).

Na taxa de transporte de elétrons (ETR) o tratamento controle apresentou uma diminuição de 10% entre a dose 0 Cr (mg L⁻¹) para a de 10 Cr (mg L⁻¹). Dentre os tratamentos de dose 0 Cr (mg L⁻¹), *C. etunicatum* apresentou a menor média, com uma redução de 11% em comparação ao controle e de 12,4% em comparação ao *R. clarus* (Figura 2).

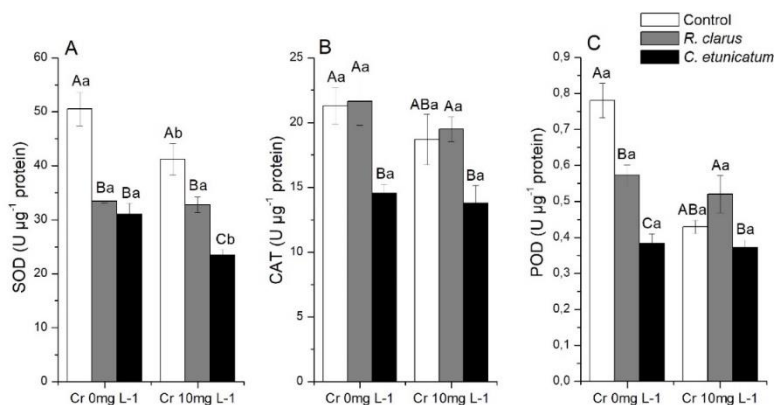
Figura 2 – Taxa de transporte de elétrons em plantas de feijão inoculadas e submetidas a doses de Crômio.



Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) no tratamento. Fonte: A Autora (2023).

Em relação as análises das enzimas antioxidantes, da enzima superóxido dismutase (SOD), na dose 0 Cr (mg L^{-1}), *R. clarus* apresentou diminuição de 33,8% e *C. etunicatum* de 38,6% em relação ao tratamento controle (Figura 3 – A). Comparando as doses 10 Cr (mg L^{-1}) e 0 Cr (mg L^{-1}) dentro de cada tratamento, houve uma diminuição de 18,4% no controle e foi de 24,5% na *C. etunicatum*. A resposta da catalase (CAT) demonstrou que *C. etunicatum* obteve as menores médias em comparação ao tratamento controle, com 31,7% na dose 0 Cr (mg L^{-1}) e de 26,23 % na dose 10 Cr (mg L^{-1}) (Figura 3 – B). A enzima peroxidase (POD) mostrou que entre os tratamentos com a dose 0 Cr (mg L^{-1}) o inoculado com *C. etunicatum* apresentou diminuição da atividade da enzima em 50,7% em relação ao controle. Na dose de 10 Cr (mg L^{-1}) foi de 13,3% (Figura 3 – C).

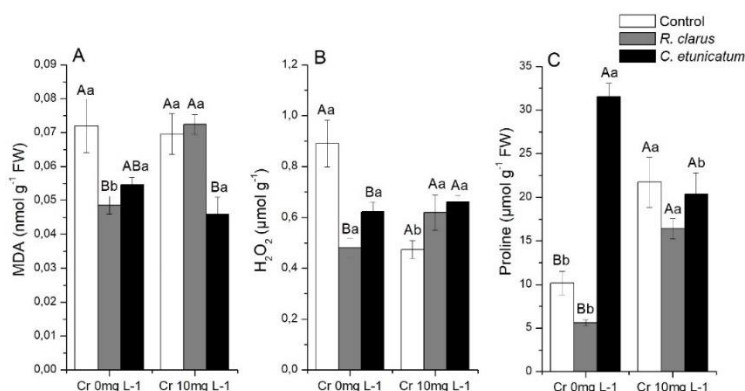
Figura 3 – Atividade das enzimas antioxidantes em plantas de feijão inoculadas e submetidas a doses de Crômio.



Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) no tratamento. Fonte: A Autora (2023).

No tratamento controle, quantificamos os níveis de malondialdeído (MDA) em diferentes doses, e nossos achados não revelaram diferenças significativas entre eles. Ao comparar os níveis de MDA entre diferentes doses de Cromo em plantas que foram inoculadas com *R.clarus* observamos um aumento significativo de 49% nos níveis de MDA nas plantas tratadas com dose de 10 (mg L^{-1}) em comparação a dose 0 (Figura 4-A). Nas plantas de feijão inoculadas com *C. etunicatum* observamos o menor teor médio de malondialdeído (MDA) entre os tratamentos na dose de 10 (mg L^{-1}), apresentando uma diminuição significativa de 34,2% em relação ao controle.

Figura 4 – Teor de malondialdeído, peróxido de hidrogênio e prolina em plantas de feijão inoculadas e submetidas a doses Crômio.

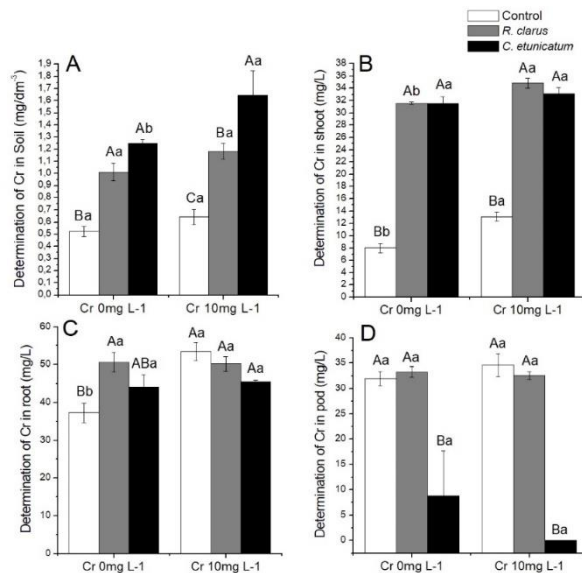


Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) no tratamento. Fonte: A Autora (2023).

No teor de peróxido de hidrogênio houve diferença significativa entre as doses 0 e 10 (mg L^{-1}), no tratamento controle de 46,7% (Figura 4 – B). Ao analisar os tratamentos que não receberam Cr, aqueles inoculados com *R. clarus* apresentaram a menor média desses níveis, apresentando notável redução de 46% em relação ao controle.

O Cr aplicado na dose 10 (mg L^{-1}) causou um aumento no teor de prolina nos tratamentos controle e inoculado com *R. clarus* (Figura 4 – C). Observamos que apenas a inoculação com *C. etunicatum* diminuiu o conteúdo de prolina na dose 10 mg L^{-1} . Essa redução não foi observada nos demais tratamentos (Figura 4 - C). Ao comparar todos os tratamentos, fica evidente que as plantas inoculadas com *C. etunicatum*, sem aplicação de cromo, apresentaram aumento significativo no teor de prolina.

Figura 5 – Determinação de Crômio encontrado no solo e na planta após conclusão do ciclo total do feijão inoculado.

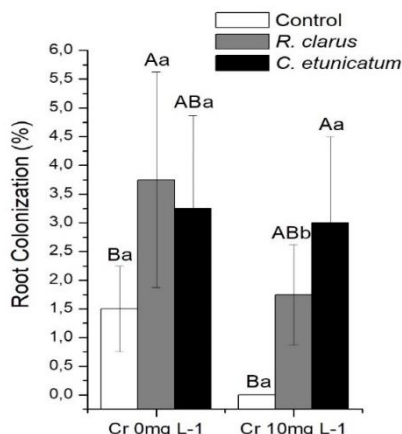


Valores médios da determinação do Crômio (10mg Cr L⁻¹ H₂O) no solo (mg dm⁻³) (A), na parte aérea (B), na raiz (C) e nas vagens (D) de plantas de *Phaseolus vulgaris* L., a partir do método de absorção atômica. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística (P<0,05) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística (P<0,05) no tratamento. Fonte: A Autora (2023)

A determinação de cromo no solo revelou que dentre os tratamentos contendo cromo, o inoculado com *C. etunicatum* apresentou a maior concentração do metal no solo, apresentando um aumento significativo de 156% em relação ao tratamento não inoculado (Figura 5 - A). O teor de cromo na parte aérea da planta indica que *C. etunicatum* não apresentou diferenças estatísticas entre as doses de cromo. Porém, no tratamento não inoculado, houve menor quantidade de cromo na parte aérea, enquanto nas raízes houve aumento de 43% no teor de cromo (Figura 5 - B, C). A determinação de cromo em plantas inoculadas com *C. etunicatum*, em comparação ao tratamento controle, revelou diminuição de 72,3% na dose de 0 (mg L⁻¹) e diminuição de 100% na dose de 10 (mg L⁻¹). Quando comparadas às plantas inoculadas com *R. clarus*, essa redução foi de 73,3% na dose 0 (mg L⁻¹) e 100% na dose 10 (mg L⁻¹) (Figura 5 - D).

A porcentagem de colonização micorrízica radicular revelou que o tratamento inoculado com *R. clarus*, quando exposto a níveis crescentes de cromo, exibiu uma diminuição significativa na colonização micorrízica de 53,3% (Figura 6).

Figura 6 – Percentual de colonização radicular por FMA em feijão e submetido a doses de Crômio.



Valores médios do percentual (%) da colonização radicular por FMA no *Phaseolus vulgaris* L colonizado com os fungos micorrizicos arbusculares, *Rhizophagus clarus* e *Claroideoglossum etunicatum* e submetidas ao crômio (10mg Cr L⁻¹ H₂O). Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística (P<0,05) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística (P<0,05) no tratamento. Fonte: A Autora (2023)

Comparando dentro de cada dose, os tratamentos não inoculados foram os que apresentaram menor colonização, indicando uma possível contaminação externa ocorrida durante a condução do experimento. No entanto foi observado que esta colonização ocorreu em baixíssima quantidade, principalmente nas plantas que receberam o metal pesado.

Em relação aos efeitos nos pesos seco e fresco da parte aérea, não foram observadas diferenças significativas (Tabela 1). Da mesma forma, não foram encontradas diferenças no comprimento e diâmetro (Tabela 2). Plantas de feijoeiro inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram diminuição significativa de 46,6% no peso seco das vagens na dose de 10 (mg L⁻¹) em comparação à dose de 0 (mg L⁻¹). Curiosamente, houve um aumento simultâneo de 23,6% no número de vagens (Tabela 2). Por outro lado, plantas de feijoeiro inoculadas com *R. clarus* e expostas ao incremento de cromo apresentaram redução significativa de 25,4% na massa seca das raízes.

Tabela 1 – Efeitos do crômio na massa fresca e massa seca do feijão inoculado

	Cr (mg L ⁻¹)	FWS	FWP	FWR	DWS	DWP	DWR
Controle	0	44,4 ^{Aa} ±7,2	36,0 ^{Ab} ±6,4	42,4 ^{Aa} ±19,6	6,3 ^{Ab} ±0,9	1,3 ^{Aa} ±0,2	5,3 ^{Aa} ±1,1
	10	54,4 ^{Aa} ±7,9	48,7 ^{Aa} ±10,5	23,4 ^{ABb} ±3,3	8,0 ^{Aa} ±1,5	1,0 ^{Aa} ±0,2	5,2 ^{Aa} ±0,9
<i>Rhizophagus clarus</i>	0	48,5 ^{Aa} ±2,9	47,3 ^{Aa} ±8,3	35,8 ^{Aa} ±7,5	7,4 ^{Aa} ±0,6	1,2 ^{Aa} ±0,3	7,0 ^{Aa} ±1,4
	10	43,6 ^{Aa} ±7,6	36,5 ^{Ab} ±5,3	35,6 ^{Aa} ±7,9	6,5 ^{Aa} ±0,9	0,9 ^{Aa} ±0,1	5,2 ^{Ab} ±1,2
<i>Claroideoglossum etunicatum</i>	0	41,9 ^{Aa} ±7,2	42,6 ^{Aa} ±3,5	29,7 ^{Aa} ±9,5	6,2 ^{Aa} ±0,5	1,3 ^{Aa} ±0,3	6,4 ^{Aa} ±0,4
	10	45,7 ^{Aa} ±5,4	47,4 ^{Aa} ±2,9	18,4 ^{Ba} ±4,6	7,1 ^{Aa} ±0,5	0,7 ^{Ab} ±0,12	6,4 ^{Aa} ±0,4

Valores médios (±) de desvio padrão de massa fresca da parte aérea (MF_{PA}), massa fresca das vagens (MF_V), massa fresca da raiz (MF_R) massa seca da parte aérea (MS_{PA}), massa seca das vagens (MS_V) e massa seca da raiz (MS_R) nas plantas de *Phaseolus vulgaris* L. submetidas ao crômio (10mg Cr L⁻¹ H₂O). Letras maiúsculas diferentes indicam

diferença estatística ($P < 0,05$) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) no tratamento. Fonte: Autores, 2023.

Tabela 2 – Efeitos do crômio no desenvolvimento da parte aérea do feijão inoculado.

	Cr (mg L ⁻¹)	LN	PN	NN	SL	D
Controle	0	56,25 ^{Aa} ± 3,5	20,75 ^{Aa} ± 2,9	4,75 ^{Ba} ± 0,5	79,52 ^{Aa} ± 8,5	3,48 ^{Aa} ± 0,3
	10	60,75 ^{Aa} ± 6,3	23,5 ^{Aba} ± 1,7	5,25 ^{Aa} ± 0,5	93,25 ^{Aa} ± 14,4	3,61 ^{Aa} ± 0,1
<i>Rhizopagus clarus</i>	0	52,25 ^{Aa} ± 2,8	23,0 ^{Aa} ± 1,6	5,5 ^{Aba} ± 0,5	88,75 ^{Aa} ± 0,9	3,65 ^{Aa} ± 0,02
	10	55,0 ^{Aba} ± 1,2	21,5 ^{Ba} ± 5,0	5,25 ^{Aa} ± 0,9	78,75 ^{Aa} ± 16,7	3,86 ^{Aa} ± 0,3
<i>Claroideoglomus etunicatum</i>	0	57,75 ^{Aa} ± 0,5	22,25 ^{Ab} ± 1,5	6,0 ^{Aa} ± 0,5	81,75 ^{Aa} ± 4,7	3,72 ^{Aa} ± 0,1
	10	51,75 ^{Bb} ± 4,7	27,5 ^{Aa} ± 4,1	5,5 ^{Aa} ± 0,5	82,75 ^{Aa} ± 13,4	3,81 ^{Aa} ± 0,4

Valores médios (±) desvio padrão de número de folhas (N_F), número de vagens (N_V), número de nós (N_N) comprimento de parte aérea (C_{PA} - cm), e diâmetro (D - cm) nas plantas de *Phaseolus vulgaris* L. submetidas ao crômio (10mg Cr L⁻¹ H₂O). Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) entre as doses; Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($P < 0,05$) no tratamento. Fonte: Autores (2023).

4 DISCUSSÃO

Tecnologias baseadas em microrganismos são uma alternativa para a biorremediação. Apesar da toxicidade do Cr para muitos microrganismos, várias espécies bacterianas resistentes foram identificadas (JAMIL et al., 2022). O Cr tem efeito tóxico no crescimento das plantas (DIACONU et al., 2020). Nossos estudos mostraram que cepas de *C. etunicatum* têm maior tolerância ao Cr, mitigando seus efeitos danosos.

A atividade fotossintética garante a produção biológica das plantas. Condições estressantes causam desequilíbrio nos sistemas de proteção e metabolismo celular, reduzindo a fotossíntese e impactando a produtividade geral. Isso fornece informações valiosas sobre adaptação e estabilidade das plantas, ajudando a compreender suas respostas ambientais. O crescimento reduzido frequentemente resulta do declínio na atividade fotossintética. Fatores como composição do substrato e local de cultivo são significativos nas limitações fotossintéticas. Avaliar parâmetros de troca gasosa melhora a compreensão da capacidade adaptativa das plantas e sua prosperidade sob diversas condições (PEREIRA et al., 2019).

Neste estudo, o estágio vegetativo em que foram medidas trocas gasosas e taxa de transporte de elétrons é crucial para o crescimento das plantas. Fatores adversos nesta fase impactam significativamente a produção de feijão. Processos fisiológicos como trocas gasosas e transporte de elétrons influenciam diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas. Perturbações nessa fase afetam o rendimento e produtividade. Compreender e monitorar esses processos permite identificar fatores que impedem o crescimento e tomar medidas para mitigar seus efeitos, garantindo produção ótima de feijão (KRON; SOUZA; RIBEIRO, 2008).

Não foram encontradas diferenças nos valores de concentração intercelular de CO₂ (C_i) e taxa de transporte de elétrons (ETR) entre os tratamentos e concentrações utilizados neste estudo. Esses parâmetros refletem a eficiência da fotossíntese e do transporte de elétrons, cruciais para a produção de energia e assimilação de carbono. A ausência de diferenças sugere que os tratamentos e concentrações não impactaram significativamente esses processos. No entanto, é essencial considerar outros parâmetros fisiológicos e bioquímicos, além do

desempenho e crescimento global da planta, para uma compreensão abrangente dos efeitos dos tratamentos na fisiologia da planta.

Um estudo com feijão-caupi sob diferentes adubações mostrou que variáveis fisiológicas como eficiência de carboxilação instantânea, condutância estomática e eficiência no uso da água não diferiram significativamente entre os períodos vegetativo e pré-floração. Isso sugere que a disponibilidade de luz e nutrientes foi adequada para o desempenho fotossintético ótimo. As plantas mantiveram um estado fisiológico consistente nessas fases, sem limitações aparentes de luz e nutrientes. Costa (2020) destaca a importância de considerar esses parâmetros fisiológicos na compreensão da resposta da planta a diferentes estratégias de fertilização e seu impacto na eficiência fotossintética.

Neste estudo, ao comparar duas espécies de FMAs, *R. clarus* mostrou redução na fotossíntese e transpiração com o incremento de crômio, enquanto *C. etunicatum* apresentou maiores médias nessas condições e aumento da condutância estomática. Esses resultados sugerem que *C. etunicatum* melhora o desempenho das plantas e a tolerância ao estresse na presença de crômio. Mais pesquisas são necessárias para entender os mecanismos subjacentes e explorar as aplicações de *C. etunicatum* em ambientes contaminados com crômio. Segundo Maia (2019), em sua pesquisa com respostas morfofisiológicas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.), associado a FMAs e rizóbios em solo com mineração de manganês, tratamentos com micorrizas mostraram maiores valores de fotossíntese líquida, transpiração e condutância estomática. Isso destaca o papel dos fungos na promoção da resiliência das plantas e tolerância ao estresse. As descobertas sugerem que a associação simbiótica entre plantas e FMAs pode melhorar processos fisiológicos e ajudar na adaptação das plantas em ambientes desafiadores.

A contaminação do solo por metais pesados é uma questão ambiental significativa devido ao uso extensivo desses elementos na indústria e agricultura. Metais pesados são liberados no solo por resíduos industriais, mineração e agroquímicos, representando riscos aos ecossistemas e à saúde humana ao persistirem no ambiente e acumularem-se na cadeia alimentar (SALA et al., 2021). Como outros fatores de estresse abióticos, os metais pesados podem causar danos diretos ou indiretos às células vegetais através da alta produção de espécies reativas de oxigênio (ERO). Essas espécies reativas podem levar ao estresse oxidativo nas células, danificando lipídios, proteínas e ácidos nucleicos (MARQUES et al., 2019). O estresse oxidativo resultante pode causar disfunção celular, danos ao DNA, peroxidação lipídica e comprometimento da atividade enzimática. Metais pesados também podem interferir diretamente em processos celulares vitais, como inibição enzimática e alteração da permeabilidade da membrana celular, comprometendo o crescimento e metabolismo das plantas (SOUZA, 2018). Um estudo com feijão-caupi sob restrição hídrica e aplicação foliar de silício mostrou que enzimas como ascorbato peroxidase e superóxido dismutase são cruciais para a tolerância ao estresse ao eliminar ERO e promover a defesa contra o estresse (SILVA et al., 2019).

A primeira linha de defesa da planta envolve adaptações anatômicas e fisiológicas no aparato fotossintético. A segunda estratégia inclui a ativação de defesas antioxidantes, como

superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), e ascorbato peroxidase (APX), além de componentes não enzimáticos (Foyer et al., 1994; Halliwell et al., 1989). Enzimas como SOD e CAT desintoxicam espécies reativas de oxigênio (ROS). Peroxidases (POD) utilizam H_2O_2 como oxidante e compostos fenólicos como doadores de elétrons, eliminando H_2O_2 formado pela SOD (FREITAS et al., 2008; BARBOSA et al., 2014). Nosso estudo mostrou que tratamentos com fungos micorrízicos arbusculares reduziram a atividade enzimática, mesmo sob estresse. Um estudo com *Aspergillus* sp. na presença de cádmio (Cd) também mostrou redução da atividade enzimática, intensificada na concentração controle da cepa fúngica (GUELFÍ et al., 2003). Isso apoia a ideia de que fungos podem aliviar o estresse, diminuindo a necessidade de ativação enzimática, mesmo na presença de cromo.

É válido ressaltar que o solo do tratamento sem adição de Cr continha uma pequena presença natural de Cr (Figura 5), ajudando a entender as respostas bioquímicas das plantas com ou sem agentes fúngicos. Plantas inoculadas com *R. clarus*, sem estresse de Cr, apresentaram atividade reduzida de enzimas antioxidantes como SOD, CAT e POD, resultando em níveis mais baixos de MDA e diminuição da peroxidação lipídica. A redução da atividade enzimática é atribuída à neutralização das ERO pelo inoculante fúngico. A pesquisa indica que a aplicação de microrganismos para biorremediação de Cr aumenta a capacidade antioxidante das plantas (VISHNUPRADEEP et al., 2022; JAMIL et al., 2022).

Na mesma condição, o teor de prolina aumentou. A prolina é um dos aminoácidos mais estudados devido à sua sensibilidade a condições adversas contribui para a eliminação de ERO e a estabilização de estruturas subcelulares (BHAGYAWANT et al., 2019). Além de atuar como um importante osmorregulador e eliminador de ERO, a prolina também desempenha um papel na redução da toxicidade de metais pesados, induzindo a formação de fitoquelatinas que se ligam aos metais pesados (HAYAT et al., 2012). Em um estudo utilizando inóculo de *Clarideoglossum etunicatum* em plantas de manjeriço, foi observado um acúmulo significativo de prolina nas folhas inoculadas sob condições estressantes. Esta descoberta destaca o papel benéfico da prolina como osmólito para as plantas, demonstrando sua capacidade de apoiar a resiliência das plantas em vários ambientes (BONACINA et al., 2020).

Plantas inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram diminuição significativa no teor de MDA nos tratamentos com cromo, indicando menores níveis de peroxidação lipídica (Figura 4). Isso sugere que a inoculação com *C. etunicatum* reduziu o dano oxidativo causado pelo cromo, como evidenciado pelos menores níveis de MDA. Adicionalmente, houve diminuição da atividade das enzimas SOD, CAT e POD nas plantas inoculadas com *C. etunicatum* sob cromo. Esse resultado pode ser atribuído à ação dos fungos micorrízicos arbusculares na neutralização de espécies reativas de oxigênio (ERO), reduzindo a degradação da membrana e os níveis de MDA. Esses efeitos podem beneficiar as plantas, indicando um papel ativo de *C. etunicatum* na tolerância ao estresse hídrico. Islam et al. (2016) e Vishnupradeep et al. (2022) observaram resultados semelhantes em plantas de milho inoculadas com bactérias expostas ao estresse de Cr, relatando que as bactérias reduziram a toxicidade dos metais e o estresse oxidativo, diminuindo o acúmulo de enzimas antioxidantes.

A contaminação por metais pesados emergiu como um risco ambiental significativo globalmente nas últimas décadas, levantando novas preocupações relativamente à sua remediação (SHARMA et al., 2022). Devido à sua presença global no ambiente e nas fontes alimentares (NESHAT et al., 2022), o cromo (Cr) representa um risco aumentado de vários tipos de cancro e é reconhecido como um agente neurotóxico (WISE et al., 2022). O cromo não tem função essencial nas plantas e, portanto, não existe um mecanismo específico de absorção do cromo nas plantas (OLIVEIRA, 2012; SHARMA et al., 2020). Por outro lado, a absorção e translocação de Cr na planta ficam limitadas às raízes quando avaliadas de forma compartimentada (MANGABEIRA et al., 2011). A deposição de Cr nas partes aéreas das plantas depende da sua forma química. Após sofrer modificações químicas, pode se fixar à parede celular da planta (SHARMA et al., 2020; CARY et al., 1977).

Determinar os níveis de cromo no solo revela que os metais podem ser retidos por vários mecanismos. As propriedades químicas do solo são cruciais, pois os metais são adsorvidos por forças eletrostáticas ou formam ligações específicas. Compostos orgânicos também podem metabolizar esses metais, influenciando sua retenção no solo (MATOS et al., 1996). Avaliar a resposta do solo e das plantas ao cromo metálico inclui determinar seus níveis na parte aérea, nos grãos e no solo da planta, fornecendo insights sobre a capacidade do sistema de lidar com a contaminação por cromo. A análise do solo indicou a presença natural de cromo (Cr), evidenciada pelas pequenas quantidades encontradas nos potes que não receberam a solução contendo o metal. Comparando os valores médios de todos os tratamentos, observou-se que as plantas controle apresentaram menor concentração de Cr no solo, sugerindo metabolização do metal pelas plantas. Em contraste, maior detecção de metais foi encontrada nos vasos inoculados, indicando um papel potencial dos fungos micorrízicos arbusculares no aumento da absorção ou retenção de Cr (Fig. 5 – B, C e D).

Em relação à absorção de Cr, as folhas foram os órgãos da planta que acumularam maior quantidade do composto. Resultados semelhantes são descritos por Andrade, Jorge e Silveira (2005) em uma espécie de feijão cultivada em solos contaminados com cádmio. As plantas foram inoculadas com *Glomus etunicatum* (ou *Claroideoglomus etunicatum*), *G. intraradices* e *G. macrocarpum*, e a micorrização aumentou as concentrações de metais na parte aérea, sendo *G. etunicatum* a espécie mais promissora para fitorremediação de espécies de feijoeiro. Por outro lado, em relação aos níveis de cromo detectados nas raízes e vagens (produto comercial final) das plantas provenientes dos tratamentos inoculados com *C. etunicatum*, observamos diminuição na absorção de Cr. A ocorrência de contaminação do solo por metais pesados, incluindo Cr, foi relatada em sementes de milho (*Zea mays* L.) por Onyejekwe et al., 2019.

Em estudo que avaliou a produtividade das culturas de trigo, alface e rabanete em solo tratado com resíduo de curtume e cromo hexavalente, o lodo alterou as propriedades físico-químicas do solo. O Cr⁶⁺ teve efeito tóxico e reduziu o percentual de produtividade das plantas, principalmente do milho, enquanto seus teores totais no solo foram reduzidos. (CASTILHOS; TEDESCO; VIDOR, 2002). Nossos achados são de grande relevância, pois as vagens e suas sementes são produtos comerciais finais que podem ser consumidos por humanos ou animais,

e o Cr tem a capacidade de ser retido e acumulado em tecidos biológicos. Porém, o tratamento com *C. etunicatum* pode diminuir sua contaminação.

R. clarus mostrou maior sensibilidade ao aumento de Cr, com maior colonização na ausência de estresse. Em contraste, *C. etunicatum* manteve sua colonização na presença de Cr, sugerindo aumento da tolerância do feijão ao metal. Isso foi apoiado pela diminuição do teor de MDA, indicando redução do dano oxidativo, e pela manutenção das atividades fotossintéticas e da biomassa. Além disso, *C. etunicatum* contribuiu para menor acúmulo de Cr nas vagens e exibiu maior colonização sob contaminação por Cr. Essas descobertas destacam o potencial de *C. etunicatum* na mitigação dos efeitos adversos da contaminação por cromo em feijões.

5 CONCLUSÃO

Em resumo, os resultados deste estudo fornecem evidências de que a inoculação de FMAs, especialmente *C. etunicatum*, pode ser uma estratégia promissora para melhorar a tolerância dos feijoeiros à contaminação por Cr, reduzindo os efeitos negativos na fisiologia vegetal e facilitando a remediação de solos contaminados com metais pesados. Essas descobertas contribuem para o avanço do conhecimento na área de biorremediação e destacam o potencial das interações planta-FMA na mitigação dos impactos ambientais causados pela contaminação por metais pesados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Q. R. DE . *et al.*. Reinoculation of topdressing *Rhizobium tropici* combined or not with *Azospirillum* brasilense in common bean. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 52, n. Pesqui. Agropecu. Trop., 52, 2022.
- ANDRADE, S. A. L. de; JORGE, R. A.; SILVEIRA, A. P. D. da. Efeito cádmio na associação de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e fungos micorrízicos arbusculares. *Scientia agrícola [online]*. v. 62, n. 4, p. 389-394, 2005.
- BARBOSA, M. R. *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 453-460, mar. 2014.
- BARBOSA, M. V. *et al.* Diferentes fungos micorrízicos arbusculares afetam a formação e estabilidade dos agregados do solo? **Ciência e Agrotecnologia [online]**. 2019, v. 43 e003519, 2019.
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, n. 1, p. 205–207, 1973.
- BHAGYAWANT, S.S., *et al.* Variações na eliminação de antioxidantes e radicais livres sob estresse induzido por metais pesados expressos como teor de prolina no grão de bico. **Fisiol. Mol. Biol. Plantas** v. 25, p. 683-696, 2019.
- BILGUER, W.; SCHREIBER, U.; BOCK, M. Determination of the quantum efficiency of photosystem II and non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in the field. **Oecologia** **102**, p. 425-432, 1995.
- BONACINA, C. *et al.* Fungos micorrízicos arbusculares na tolerância à seca: resposta no metabolismo antioxidante de *Ocimum basilicum* L. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento [S. l.]**, v. 9, n. 12, e32991211016, 2020.
- BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Anal. Biochem**, v. 72, p. 248-254. 1976.
- CARY, E.; ALLAWAY, W. H.; OLSON, O. E. Control of chromium concentrations in food plants. 1. Absorption and translocation of chromium by plants. *Journal of Agricultural and food chemistry*, v. 25, n. 2, p. 300-304, 1977.



- CASTILHOS, D. D., TEDESCO, M. J. E VIDOR, C. Rendimentos de culturas e alterações químicas do solo tratado com resíduos de curtume e cromo hexavalente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo [online]**. v. 26, n. 4, p. 1083-1092. 2002.
- CETESB. Cromo e seus compostos: Ficha de informação toxicológica. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Cromio.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- COSTA, R. S. da. Respostas fisiológicas, nutricionais e produtivas em plantas de feijão-de-corda cultivadas sob fontes de adubos. 2020. 76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Fitotecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020
- DAVIES, F. T. *et al.* Mycorrhizal fungi enhance accumulation and tolerance of chromium in sunflower (*Helianthus annuus*). **Journal of Plant Physiology**, v. 158, n. 6, p. 777–786, 2001.
- DIACONU, Mariana et al. Toxicity and Microbial Bioremediation of Chromium Contaminated Effluents. In: 2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB). IEEE, 2020. p. 1-4.
- ETSESAMI H. Bacterial mediated alleviation of heavy metal stress and decreased accumulation of metals in plant tissues: Mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v.147, p.175-191, 2018.
- FARIA, A. B. de C. *et al.* Uso de ectomicorrizas na biorremediação florestal. **Ciência Florestal [online]**. 2017, v. 27, n. 1, p. 21-29, 2017.
- FREITAS, A. A. de *et al.* Atividades das enzimas peroxidase (POD) e polifenoloxidase (PPO) nas uvas das cultivares benitaka e rubi e em seus sucos e geléias. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 172-177, mar. 2008.
- FONSECA, A. J. *et al.* Papel dos fungos micorrízicos arbusculares na aclimação de clones de *Coffea arabica* L. produzidos por embriogênese somática. **Ciência e Agrotecnologia [online]**. v. 44, 2020
- FOYER, C. H.; LELANDAIS, M.; KUNERT, K. J. Photooxidative stress in plants. **Physiology Plant.**, v. 92, p. 696-717. 1994.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide Dismutases: I. OCCURRENCE IN HIGHER PLANTS". **Plant Physiol**, v. 59, p. 309–314, 1977.
- GIOVANNETTI, M., MOSSE, B.A., Evaluation of techniques for measuring VA mycorrhizal infection in roots. **New Phytol.** 84, 489–500. 1980.
- GOMES, M. R.; ROGERO, M. M.; TIRAPÉGUI, J. Considerações sobre cromo, insulina e exercício físico. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 11, n. 5, p. 262–266, 2005.
- GOMES, V. M. *et al.* Study of mobility and environmental contamination by chromium from tannery industry in two streams in the town of dobrada in the state of São Paulo, Brazil. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 5, p. 1840-1852, 2017.
- GUELFIA, AZEVEDO R.A, LEA P.J, MOLINA SM. Growth inhibition of the filamentous fungus *Aspergillus nidulans* by cadmium: an antioxidant enzyme approach. **J Gen Appl Microbiol.** v, 4, n. 2, p. 63-73 2003.
- HALLIWELL, B. Os radicais livres, espécies reativas de oxigênio e doenças humanas: uma avaliação crítica com referência especial à aterosclerose. **Jornal britânico de patologia experimental**, v. 70 n. 6, p. 737-57, 1989.
- HAYAT, S., *et al.* Papel da prolina em ambientes em mudança. **Sinal da Planta. Comportamento** v.7, p. 1-11, 2012.
- ISLAM, F. *et al.* Combined ability of chromium (Cr) tolerant plant growth promoting bacteria (PGPB) and salicylic acid (SA) in attenuation of chromium stress in maize plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 108, p. 456-467, 2016.
- JAMIL, N. *et al.* Evaluation of the bioremediation potential of *Staphylococcus lentus* inoculations of plants as a promising strategy used to attenuate chromium toxicity. **Sustainability**, v. 14, n. 20, p. 13056, 2022



KRON, A. P.; SOUZA, G. M; RIBEIRO, R. V. Water deficiency at different developmental stages of Glycine max can improve drought tolerance. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 43-49, 2008.

KOBAYASHI, Y., *et al.* O genoma de *Rhizophagus clarus* HR1 revela uma base genética comum para auxotrofia entre fungos micorrízicos arbusculares. **BMC Genomics** v. 465, n. 19, 2018.

KUMAR P.B.A.N, *et al.* Phytoextraction- the use of plants to remove heavy metals from soils. **Environmental Science and Technology**, v. 29, p. 1232-1238, 1995.

LAL, R; SINGH, R. C. Investigations of tribodynamic characteristics of chrome steel pin against plain and textured surface cast iron discs in lubricated conditions. **World Journal of Engineering**, 2019.

LEANDRO-SILVA, E. *et al.* Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. Matéria (Rio J.), 2020 25(2), 2020.

LI, C. *et al.* Hypoxia tolerance and adaptation of anaerobic respiration to hypoxia stress in two *Malus species*. **Scientia Horticulturae**, v.124, p.274-279, 2010.

LIU, D. *et al.* Hexavalent chromium uptake and its effects on mineral uptake, antioxidant defence system and photosynthesis in *Amaranthus viridis* L. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 7, p. 2628-2636, 2008.

LOZANO-REÁTEGUI, R. M. *et al.* Removal of metals from water of Yarinacocha Lagoon with activated carbon from cocoa pod husks. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. Rev. bras. eng. agríc. ambient., 2023 27(2), fev. 2023.

MAIA, J. M. *et al.* Atividade de enzimas antioxidantes e inibição do crescimento radicular de feijão caupi sob diferentes níveis de salinidade. **Acta Botanica Brasilica** [online]., v. 26, n. 2, p. 342-349, 2012.

MAJHI, B.; PANDA, G. Development of efficient identification scheme for nonlinear dynamic systems using swarm intelligence techniques. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 556-566, 2010.

MANGABEIRA, P. A. *et al.* Compartmentalization and ultrastructural alterations induced by chromium in aquatic macrophytes. **Biometals**, v. 24, p. 1017-1026, 2011.

MARQUES, D.N., *et al.* Antioxidant defense response in plants to cadmium stress. In: HASANUZZAMAN, M., PRASAD, M.N.V., NAHAR, K. (Eds.), **Cadmium Tolerance in Plants**, p. 423–461, 2019.

MARQUES, A. P. G. C.; RANGEL, A. O. S. S.; CASTRO, P. M. L. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean-Up technology Critical Reviews in **Environmental Science and Technology**, 2009.

MATOS, A.T. *et al.* Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, n. 3, p. 379-386, 1996.

MAURYA, A.; KUMAR, P. S.; RAJ, A. Characterization of biofilm formation and reduction of hexavalent chromium by bacteria isolated from tannery sludge. **Chemosphere**, v. 286, p. 131795, 2022.

MERLIN, E., *et al.* Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus addition increase coarse mint (*Plectranthus amboinicus* Lour.) plant growth and essential oil content. **Rhizosphere**, v. 15, 100217. 2020.

NACCOON, S., *et al.* Growth enhancement of sunchoke by arbuscular mycorrhizal fungi under drought condition. **Rhizosphere**, v. 17, 100308. 2021.

NASCIMENTO, R. L. G. do. Comportamento de Cr(III) na precipitação de PbCrO4. Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Química, 1983.

NESHAT, A., *et al.* "The concentration of potentially toxic elements (PTEs) in human milk: A systematic review, meta-analysis, and health risk assessment." **Journal of Food Composition and Analysis** 2022.



- NUNES, A. B. de C., *et al.* Nutrição de escória de aço e fosfato de milho inoculado com fungos micorrízicos arbusculares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** [online]. v. 54, e00096, 2019.
- OLIVEIRA, T.C., *et al.* O fungo micorrízico arbuscular *Rhizophagus clarus* melhora a tolerância fisiológica ao estresse hídrico em plantas de soja. *Sci Rep* v.12, n.9044, 2022.
- ONYJEKWE, I. M.; OSUJI, L. C.; NWAICHI, E. O. Accumulation of Heavy Metal in the Seeds of Zea mays L. from Crude Oil Impacted Soils in Kom-Kom, Rivers State, Nigeria. *Journal of Scientific Research and Reports*, v. 25, n. 3, p. 1-8, 2019.
- PEIXOTO, P. H. P. *et al.* Aluminum effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 11, n. 3, p. 137-143, 1999.
- PEREIRA, J. V. *et al.* Physiological responses of lima bean subjected to salt and water stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]., v. 23, n. 12 p. 959-965. 2019.
- PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infections. *Transactions of the British Mycological Society, Cambridge (Inglaterra)*, v. 55, n. 1, p. 158-161, 1970.
- PORTUONDO FARIAS, L. *et al.* Plasma Membrane Alterations in Phaseolus vulgaris L. Variety CC-25-9-N Induced by Metals. **Rev Cie Téc Agr**, San José de las Lajas, v. 29, n. 2, p. 53-63, 2020.
- QUADRO, M. S. *et al.* Crescimento e teor de cromo em mamoneira cultivada em solo receptor de resíduos de curtume e carboníferos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental** [online]. v. 24, n. 6, p. 1095-1102, 2019.
- RODRIGUEZ, E. *et al.* Chromium (VI) induces toxicity at different photosynthetic levels in pea. **Plant Physiology and Biochemistry**, 2012.
- SAMANTARY, S. Biochemical responses of Cr-tolerant and Cr-sensitive mung bean cultivars grown on varying levels of chromium. **Chemosphere**, 2002.
- SANTOS, M; ALMEIDA, A. Danos ocupacionais associados ao cromo, com ênfase no setor da conservação e restauro de obras de arte. **RPSO, Gondomar**, v. 9, p. S48-S58, 2020.
- SALA, H. R., *et al.*, Different cadmium levels alter growth and antioxidant defense response in Cedrela fissilis and Colubrina glandulosa, **Flora** 2021.
- SEADE. Mapa da Indústria Paulista 2003-2016. [S. l.], 2019. Disponível em: http://www.seade.gov.br/wp-content/uploads/2019/04/MapaIndustria_abril2019.pdf. Acesso em: 26 nov. 2019.
- SHARMA, A. *et al.* Chromium bioaccumulation and its impacts on plants: an overview. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 100, 2020.
- SHARMA, P. *et al.* "Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction." **Bioengineered** 13, no. 3 4923-4938, 2022
- SHARMA, P.; SURENDRA P. S. "Pollutants characterization and toxicity assessment of pulp and paper industry sludge for safe environmental disposal." **Emerging Treatment Technologies for Waste Management** 207-223a. 2021
- SILVA, A. R.; DUARTE, A. R. Efeitos da utilização de regulador de crescimento vegetal a base de benziladenina sob engalhamo e floração da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.): Um artigo original. Anais do 3º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma. 30-39 2020.
- SILVA, D. C. da *et al.* Silicon foliar application attenuates the effects of water suppression on cowpea cultivars. **Ciência e Agrotecnologia** [online]., v. 43 [Accessed 1 March 2022] , e023019. 2019
- SILVA, J. G. da; FERREIRA, E. P. de B.; NASCENTE, A. S. Rendimento do feijão afetado pela calagem de enchimento em sulco e aplicação de nitrogênio. **Revista Caatinga** [online]. v. 34, n. 4, p. 857-866, 2021,



SINHA, V.; PAKSHIRAJAN, K.; CHATURVEDI, R. Chromium tolerance, bioaccumulation and localization in plants: An overview. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 715-730, 2018.

SOUZA, A. K. R.; MORASSUTI, C. Y.; DEUS, W. B. de poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 9, n. 3, 2018.

ŚWIETLIK, R.; TROJANOWSKA, M. Mobility of Chromium and Its Chemical Fractions in River Sediment Polluted by Tannery Effluents (Poland). **Soil and Sediment Contamination**, v. 25, n. 3, p. 266-278, 2016.

TEIXEIRA, G. C. DA S. *et al.* Early sowing can improve irrigation water use efficiency and yield of common bean 1. v. 2017, p. 118-126, 2017.

TIWARI, K. K. *et al.* Chromium (VI) induced phytotoxicity and oxidative stress in pea (*Pisum sativum L.*): Biochemical changes and translocation of essential nutrients. **Journal of Environmental Biology**, 2009.

TOMAZELLI, D., *et al.* A inoculação de fungos micorrízicos arbusculares melhora o crescimento e a fotossíntese de mudas de *Ilex paraguariensis* (St. Hil). **Arquivos Brasileiros de Biologia e Tecnologia [online]**. v. 65 e22210333, 2022.

URCOVICHE, R.C., *et al.* Plant growth and essential oil content of *Mentha crispata* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under different levels of phosphorus. **Ind. Crop. Prod.** v. 67, p. 103–107, 2015.

VELIKOVA V., YORDANOV I., EDREVA A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. Protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**, v.151, p.59-66, 2000.

VISHNUPRADEEP, R. *et al.* Plant growth-promoting bacteria improve growth and phytostabilization potential of *Zea mays* under chromium and drought stress by altering photosynthetic and antioxidant responses. **Environmental Technology & Innovation**, v. 25, p. 102154, 2022.

WANG, F.; LIN, X.; YIN, R. Heavy metal uptake by arbuscular mycorrhizas of *Elsholtzia splendens* and the potential for phytoremediation of contaminated soil. **Plant and Soil**. Anais, 2005

WISE Jr, *et al.* "Current understanding of hexavalent chromium [Cr (VI)] neurotoxicity and new perspectives." **Environment International** 158 106877, 2022.

WU, S. *et al.* Chromium immobilization by extraradical mycelium of arbuscular mycorrhiza contributes to plant chromium tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 122, p. 10-18, 2016.